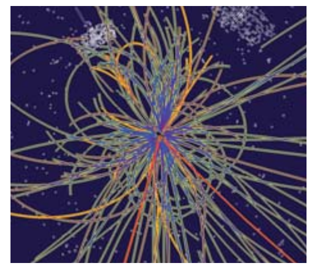
Materia exótica

J. Rubén Morones Ibarra
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL
rmorones@fcfm.uanl.mx



RESUMEN

La materia que observamos a nuestro alrededor exhibe un comportamiento que podríamos llamar estándar. Sin embargo cuando sometemos esta materia a condiciones extremas de temperatura o densidad, las propiedades físicas que observamos salen totalmente de los patrones que conocemos. A estos estados de la materia les llamamos exóticos. Por otra parte, dada la evidencia experimental de la existencia de la materia oscura, se sospecha también que hay partículas con propiedades que caen en la categoría de exóticas por su comportamiento inusual. El estudio de los estados exóticos de la materia y el de la materia exótica son en la actualidad campos de investigación muy activos en la física.

PALABRAS CLAVE

Condensado de Bose-Einstein, materia oscura, supersimétrica, axiones.

ABSTRACT

The matter around us exhibits a behavior that could be called standard. Nevertheless when this matter is subject to extreme conditions of temperature or density, the observed physical properties are out of the scheme that we know. These states of the matter are called exotics. On the other hand, given the experimental evidence of the existence of the dark matter, it is also suspected that there are particles with properties that fall into the category of exotic by their unusual behavior. The study of the exotic states of the matter and of the exotic matter are currently very active fields of research in physics.

KEYWORDS

Condensate of Bose-Einstein, dark matter, superpartner, axions.

INTRODUCCIÓN

Los estados exóticos de la materia y la materia exótica mantienen en la actualidad intensamente ocupados a los físicos. El campo de investigación de la física donde se realizan estudios teóricos y experimentales sobre el comportamiento de la materia sometida a muy bajas temperaturas o a elevadas temperaturas y presiones, ha sorprendido a los científicos por la enorme cantidad de resultados fascinantes que han arrojado. Desde los descubrimientos

de la superconductividad, de la superfluidez y del estado de plasma la búsqueda de nuevos estados ha ido cobrando cada vez más interés. Estos estados exóticos de la materia han revelado propiedades muy interesantes de la materia.

Otra línea de investigación que ocupa la atención de los científicos es la relacionada con la materia exótica. Desde que se descubrió la existencia de materia oscura en el universo se ha intentado determinar su composición. Hasta el momento la naturaleza de la materia oscura es completamente desconocida pero se tienen varios candidatos que pueden entrar en su composición.

De acuerdo con el diccionario, la palabra exótico es sinónimo de extraño. En la física de partículas elementales la materia extraña es un tipo especial de materia que contiene partículas que llevan, por propio derecho, el nombre de extrañas. Tenemos entonces que el término extraño ya está reservado para un tipo especial de materia. Para no confundir los términos se ha introducido la palabra exótica para designar al tipo de materia que tiene un comportamiento fuera de lo común.

Vale la pena aclarar que en la ciencia un fenómeno exótico o extraño deja de serlo cuando logramos explicarlo. En la física hay muchos efectos o fenómenos a los que se les agregó el calificativo de anómalo debido a que se desviaban de lo que la teoría conocida en ese momento podía explicar. Una vez explicados estos efectos dejaron de ser anómalos, mas sin embargo el nombre perduró. Así ocurrirá también seguramente con el nombre de materia exótica.

La materia exótica lo es, por supuesto, por su comportamiento y se presenta en todas las escalas de estudio de la física moderna: en el nivel nuclear, atómico, microscópico, macroscópico, estelar y cosmológico.

Las primeras observaciones de materia exótica se dieron con el descubrimiento de las partículas extrañas en la década de 1950. El nombre de partículas extrañas se originó precisamente porque exhibían un comportamiento inusual. Estas partículas son inestables y se producen en pares en un cierto tipo de reacciones nucleares. Debido a su origen se espera que tengan una vida media muy corta pero lo que se observa es que duran miles de millones de veces más tiempo que el que predice la teoría. Por este hecho y otros más, característicos de estas partículas se les llamó partículas extrañas.

Cuando se descubrió la razón de su comportamiento, el cual requirió la introducción de conceptos nuevos en la física, éstas dejaron de ser extrañas en el sentido literal pero su nombre quedó para designarlas así y, tanto a ellas como a la materia de la que pueden formar parte, se les llama materia extraña.

Las partículas extrañas no forman parte de la materia macroscópica que conocemos aquí en la Tierra, pero se especula que pueden entrar en la composición de un tipo de estrellas llamadas extrañas. Estas estrellas deben poseer una luminosidad mucho mayor que las estrellas conocidas de la misma masa y variaciones enormes de la densidad en su superficie.

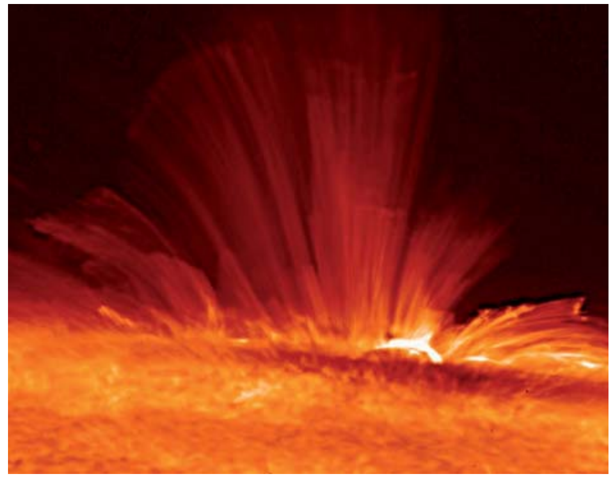
La primera sospecha de la existencia en grandes cantidades de materia exótica se dio en el año de 1975 cuando la astrónoma norteamericana Vera Rubin observó un comportamiento anómalo del movimiento de las galaxias más externas de un racimo de galaxias formado por cientos de ellas. Vera Rubin encontró que la masa necesaria para mantener las galaxias unidas en la forma como se observaba era mucho mayor que la masa observada. De estas



Vera Cooper Rubin [1928-].

observaciones se derivó uno de los más grandes misterios de la astronomía moderna, el cual consiste en la existencia de materia invisible que debería aportar, por lo menos, el 90 % de la masa total del racimo de galaxias. De aquí surgió el concepto de materia oscura.

La materia oscura, como su nombre lo indica, es un tipo de materia con masa que no es visible y por lo tanto no es detectada con los telescopios. Hasta el momento no se sabe de qué está compuesta la materia oscura, pero hay un consenso general en la comunidad científica de que es un tipo de materia no detectada hasta ahora aquí en la Tierra. Es por esto que se incluye en la lista de materia exótica.



El Sol es una masa gaseosa en estado de plasma.

ESTADOS EXÓTICOS DE LA MATERIA

En este artículo se describirán brevemente algunos ejemplos de estados exóticos de la materia y después algunos de materia exótica. Entre los primeros están los que se han denominado cuarto, quinto, sexto y séptimo estado de la materia.

EL PLASMA: CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

Las sustancias que conocemos en nuestro medio están formadas, en general, por moléculas, las cuales son agrupaciones de átomos. Los átomos, a su vez, están formados por un núcleo de carga positiva y uno o más electrones, siendo el átomo eléctricamente neutro. En un sólido las moléculas o los átomos están fuertemente unidos. Si aumentamos la temperatura del sólido, los enlaces que unen a las moléculas en el sólido se debilitan y el sólido puede pasar al estado líquido. En este estado las moléculas siguen siendo los ladrillos básicos de la sustancia original, ahora en estado líquido, pero en este estado las moléculas tienen mayor movilidad. Aumentando aún más la temperatura pasamos al estado gaseoso molecular, para después, al seguir aumentando la temperatura, llegar al estado gaseoso atómico.

A temperaturas superiores a los diez mil grados Kelvin todas las sustancias son gaseosas y existen solo en forma atómica ya que las moléculas se han disociado. Si la temperatura de este gas se sigue incrementando continúa la disociación en componentes más simples. Empiezan por desprenderse algunos electrones, formándose un gas de iones y electrones, el cual se conoce como plasma, también llamado el cuarto estado de la materia, en alusión lógica a la secuencia de estados sólido, líquido y gaseoso como los tres estados de la materia. Por definición, un plasma es un gas ionizado con carga neta total igual a cero. El ejemplo típico de plasma es el del Sol, el cual es una inmensa masa gaseosa en estado de plasma. Otro ejemplo lo encontramos en la flama que aparece en el fuego, la cual es materia en estado de plasma.

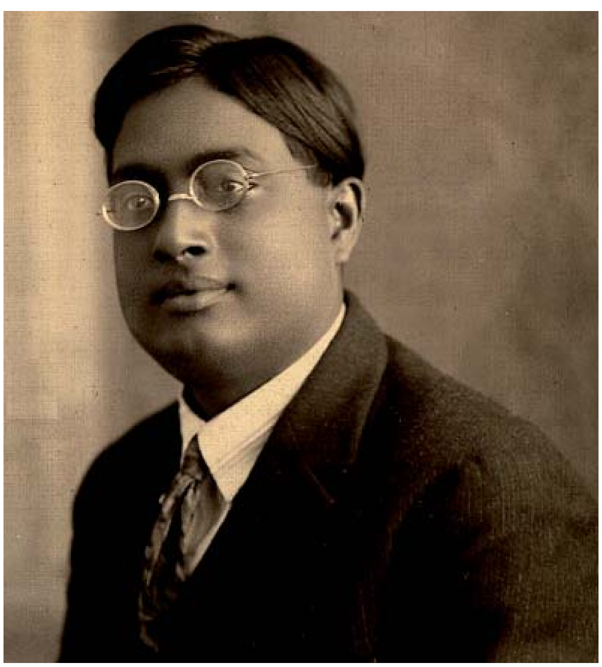
En general, una vez que tenemos un gas, la manera de llegar al plasma puede ser elevando la temperatura o también generando una descarga eléctrica, la cual provoca la ionización. También se logra la ionización mediante la irradiación del gas con ondas electromagnéticas de alta energía. El gas en una lámpara de mercurio está en estado de plasma.

Incluimos al plasma en la categoría de la materia exótica por no ser un estado que caiga dentro de la clasificación elemental de sólidos, líquidos o gases. Sin embargo, considerando la materia ordinaria de todo el universo, el plasma resulta ser el estado más común. Dado que es el estado en el que se encuentran las estrellas y el gas cósmico, este es el estado en el que se encuentra el 99% de la materia ordinaria total del cosmos. Se distingue aquí la materia ordinaria de la materia oscura de la que hablaremos en otra parte de este artículo.

CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN: QUINTO Y SEXTO ESTADOS DE LA MATERIA

El condensado de Bose-Einstein es un estado de la materia que se alcanza cuando un sistema formado por átomos se enfría a temperaturas cercanas al cero absoluto. En este estado aparecen manifestaciones macroscópicas de fenómenos cuánticos que ocurren en los átomos y que se observan en el comportamiento colectivo de un sistema. El sistema se comporta de una manera muy particular, en la cual sus propiedades colectivas corresponden al comportamiento de un solo átomo. Es un fenómeno que se asemeja al fenómeno láser, donde la luz, que está formada por un conjunto muy grande de fotones que están en fase, no presenta dispersión, es decir, no se descompone en componentes como la luz ordinaria. Similarmente, en el condensado de Bose-Einstein, los átomos se comportan como si la función de onda que describe a cada uno fuera una sola que describe a la totalidad, esto es, todos los átomos se comportan coherentemente, como los fotones en un láser.

Los átomos de helio son bosones, este es el nombre dado a ciertas partículas de acuerdo con sus propiedades estadísticas. De acuerdo con la física estadística, un gas de bosones a muy baja temperatura debe presentar un fenómeno que se interpreta como un cambio de fase. A una temperatura determinada cercana al cero absoluto, ocurre que todas las partículas se colapsan al estado cuántico de más baja energía.



Satyendra Nath Bose [1894-1974]. Desarrolló la teoría sobre el comportamiento de un sistema de partículas de espín entero, llamados bosones en su honor.

Como los bosones no obedecen el principio de exclusión de Pauli, el fenómeno se explica debido a que un estado cuántico puede ser ocupado por varios bosones. Bajo ciertas circunstancias, la aglomeración de muchos bosones en un mismo estado es más probable que ocurra que la de encontrar bosones en diferentes estados. Cerca del cero absoluto los bosones tienden a aglomerarse en el estado de mínima energía, llamado estado base. Cuando esto sucede el comportamiento colectivo de los bosones muestra fenómenos muy especiales. A este estado se le conoce como condensado de Bose-Einstein.

El fenómeno de la superfluidez ya mencionado es un caso de condensado de Bose-Einstein y se explica como tal. Se dice que el helio-II es un condensado de Bose-Einstein, es decir, es un estado donde todos los átomos que forman el sistema se condensan en el estado de más baja energía.[1]

HELIO-4 Y HELIO-3

El helio-4 es el átomo más común de helio, el cual tiene un núcleo con dos protones y dos neutrones. En este tipo de átomo fue donde primero se observó el condensado de Bose-Einstein, es decir, el fenómeno de la superfluidez. Las propiedades del helio en estado superfluido, es decir del helio-II, se explican desde el punto de vista de la teoría cuántica en función del orden que presentan los átomos en el estado fundamental, (el de más baja energía). El helio-II es un líquido cuántico, en el sentido de que sus extrañas propiedades no pueden ser explicadas clásicamente. La fase de helio-II consiste de átomos que se encuentran todos en el estado base y actúan en forma colectiva, donde el efecto sobre un átomo está estrechamente relacionado con lo que les ocurre a todos los demás. Este efecto colectivo hace que, paradójicamente, todos los átomos del condensado se comporten como un solo átomo. Este fenómeno de alto nivel de ordenamiento impide la turbulencia, evitando las pérdidas de energía y por lo tanto dando como resultado viscosidad nula. Al condensado de

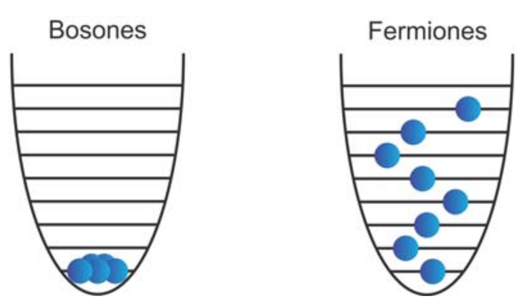
Bose-Einstein del helio-4 se le conoce como el quinto estado de la materia.

Por mucho tiempo se pensó que en el helio-3, que es un átomo de helio pero con dos protones y un solo neutrón en el núcleo, no podría presentarse el fenómeno de condensado de Bose-Einstein. En realidad para el caso del helio-3 lograr el estado de superfluidez, es decir el condensado de Bose-Einstein, es un problema mucho más difícil que para el caso del helio-4 debido a que para el helio-3 la temperatura de transición al estado superfluido es de unos pocas milésimas de Kelvin.

El helio-3 es un tipo de partícula llamada fermión y no obedece la estadística de Bose-Einstein. Por eso se pensó que no es posible esperar que se presentara un estado condensado del tipo de Bose-Einstein. Sin embargo el fenómeno fue observado experimentalmente en el año de 1972, lo cual causó asombro en la comunidad científica. La explicación del fenómeno, que sólo puede darse en términos de bosones, se consiguió siguiendo una línea de razonamiento muy parecida a la de la explicación de la superconductividad. Se supuso que los átomos de helio-3 se unen formando pares, como los pares de Cooper. Este apareamiento produce una partícula nueva que resulta ser un bosón. Podemos imaginar este par de partículas como formando un solo ente, donde una gira alrededor de la otra dando un bosón.

El mecanismo de superfluidez en el helio-4 es el condensado de Bose-Einstein, mientras que en el del helio-3 es también un condensado de Bose-Einstein pero de partículas compuestas, similares a los pares de Cooper, formados por parejas de átomos de helio-3, acoplándose para formar estructuras de espín cero, esto es, de bosones. Al condensado de Bose-Einstein del helio-3 se le conoce como el sexto estado de la materia.

Como resumen de lo que ocurre en las bajas temperaturas, decimos que en ellas encontramos tres estados exóticos de la materia observados hasta ahora: el estado superconductor, el superfluido, y el Condensado de Bose-Einstein del helio-3.

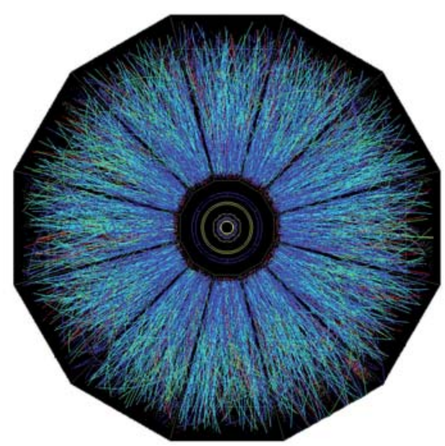


Las partículas con espín entero son llamadas bosones. Un gas de bosones a muy baja temperatura puede condensarse en un estado donde todas las partículas están en el nivel de energía mas bajo. Este estado se conoce como condensado de Bose-Einstein.
En un gas de fermiones cada estado cuántico puede ser ocupado por una sola partícula.

PLASMA DE QUARKS Y GLUONES: SÉPTIMO ESTADO DE LA MATERIA

Uno de los campos de investigación en física que ha atraído el interés de amplios grupos de investigadores es el del estudio de la materia en condiciones extremas de densidad y temperatura. El interés de los científicos es saber cómo responde la materia cuando se le somete a condiciones de elevada temperatura y densidad. Estas condiciones extremas requieren grandes cantidades de energía incluso cuando se estudian cantidades de materia del orden de microgramos. En lugar de someter a estas condiciones extremas a cantidades “macroscópicas” de materia, los científicos han buscado hacerlo con núcleos atómicos pesados, provocando colisiones entre ellos a una gran energía.

Cuando dos núcleos chocan a gran velocidad, la materia nuclear que los forma sufre un aumento considerable en su temperatura y densidad. La temperatura de los núcleos puede alcanzar valores de



Un QGP (Quark Gluon Plasma) es formado en la región de choque de dos iones de oro a velocidades relativistas en el centro del detector STAR en el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC) en el Laboratorio Nacional Brookhaven, Estados Unidos.

millones de grados centígrados. En estas condiciones se espera que los nucleones (protones y neutrones) se disuelvan en sus constituyentes: los quarks y los gluones. A niveles subnucleares todos, los campos como el campo electromagnético o el campo de los gluones, se comportan como partículas. Por eso decimos que los constituyentes de los nucleones son quarks y gluones. Así como hablamos de un cambio de estado o transición de fase cuando el agua líquida pasa al estado gaseoso, así se habla de una transición de fase cuando los nucleones pasan de su estado de nucleones individuales a una sopa de quarks y gluones. A este estado de quarks y gluones se le conoce como plasma de quarks y gluones (PQG) y se le llama el séptimo estado de la materia.

Los desarrollos de grandes máquinas para acelerar partículas, como iones pesados (núcleos de oro o de plomo, por ejemplo) han permitido lograr que estos alcancen velocidades cercanas a la de la luz. Con esto ha surgido el interés por provocar colisiones entre estos iones viajando a velocidades relativistas y observar como se comporta la materia durante estas colisiones. Cuando dos partículas chocan a grandes velocidades, sus constituyentes entran en una gran agitación térmica, lo que significa un estado de elevada temperatura. También, debido a la colisión, las partículas se comprimen sometiendo a la materia a una elevada densidad.

Las predicciones teóricas establecen la existencia del PQG, el cual aparece a elevadas temperaturas y altas presiones, provocando que los neutrones y protones se desintegren en sus constituyentes fundamentales.[2] Estas conclusiones se obtienen mediante cálculos y métodos de simulación por computadora basados en la teoría que describe el comportamiento de los quarks y gluones. El nombre de esta teoría es Cromodinámica Cuántica.

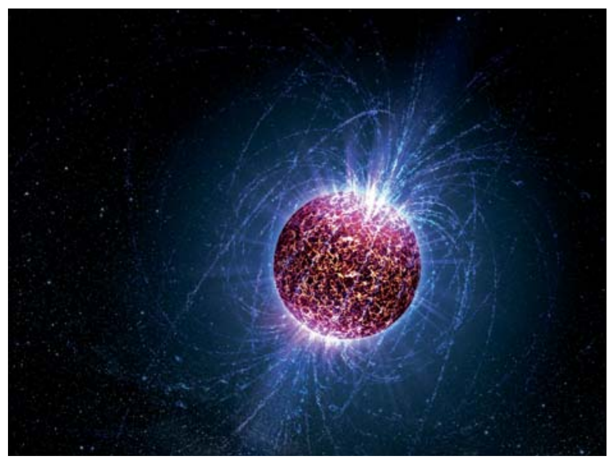
El reto es intentar realizar los experimentos y si se logran reproducir las condiciones necesarias, saber si este estado de la materia puede ser producido en el laboratorio. Se supone que en los primeros microsegundos del universo la materia estaba en el estado de plasma de quarks y gluones. Lograr en el laboratorio obtener el PQG es como reproducir las condiciones en las que se encontraba el universo unos instantes después del Big Bang. Este es uno de los aspectos interesantes del estudio de este sistema de PQG.

ESTRELLAS DE NEUTRONES

En el proceso de evolución de una estrella, la materia inicial de la que está formada se descompone en núcleos atómicos y electrones debido a la elevada temperatura. Posteriormente, dependiendo de ciertas condiciones sobre el valor de su masa, los protones del núcleo reaccionan con los electrones produciéndose una transformación nuclear que da neutrones como producto de esta reacción. Esto convierte a la estrella en una estrella de neutrones.

Las estrellas de neutrones están entre los objetos astronómicos más fascinantes del universo. Los estados en los que se encuentra la materia en el núcleo de estas estrellas son todavía un misterio para nosotros. Se especula que hay estados superconductores y superfluidos, además de la posibilidad de que la materia se encuentre en su estado más primitivo que es el de PQG.

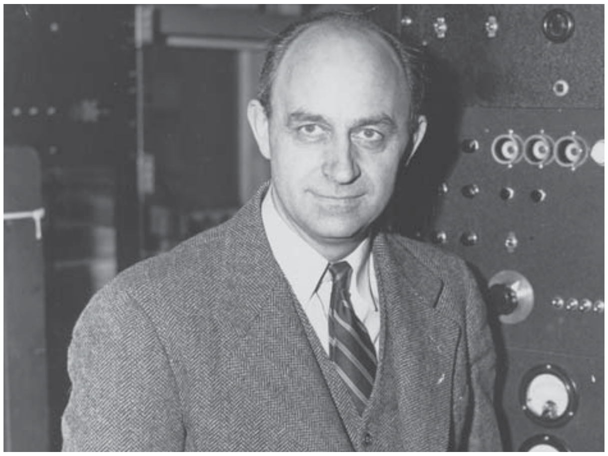
Para entender mejor el comportamiento de las estrellas en su proceso evolutivo es conveniente introducir algunas ideas fundamentales.



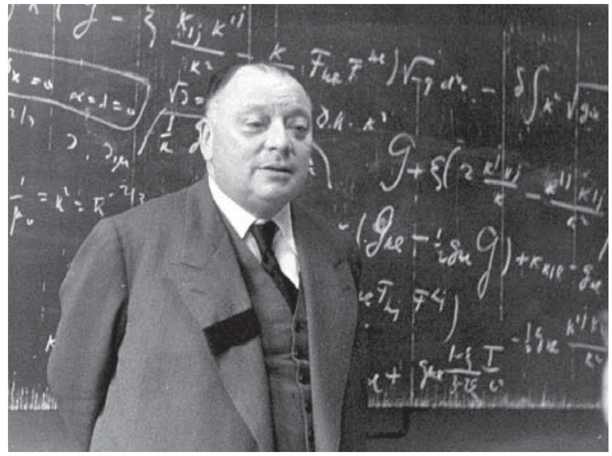
Estrella de neutrones observada por astrónomos de la Universidad estatal de Pennsylvania y de la Universidad de McGill.

GAS DE FERMI

Un gas cuántico o degenerado, es aquel en el que se manifiestan los efectos cuánticos. Estos efectos aparecen a muy bajas temperaturas donde ocurre que los estados orbitales del sistema, para un gas de Fermi, tienen pocos estados disponibles para el número de partículas que tiene el gas. A muy bajas temperaturas o a altas densidades se presentan estos efectos.



Enrique Fermi [1901-1954]. Fermi y Dirac desarrollaron la teoría que explica el comportamimento de los gases cuánticos formados por electrones o cualquier tipo de partículas idénticas de espín semientero.



Wolfgang Ernst Pauli [1900-1958]. En el año de 1925 introdujo el principio de exclusión que lleva su nombre. Este principio permitió explicar los estados cuánticos atómicos.

En la física estadística, la descripción de los estados gaseosos se realiza mediante un análisis estadístico del comportamiento de las partículas. A temperaturas y densidades ordinarias, el comportamiento de los gases se puede describir mediante la física estadística clásica. Sin embargo, cuando consideramos bajas temperaturas o elevadas densidades, la descripción clásica no es adecuada ya que los efectos cuánticos son importantes. Al introducir consideraciones cuánticas en los cálculos estadísticos obtenemos los gases cuánticos. Entre las propiedades puramente cuánticas de un sistema de partículas tenemos el comportamiento determinado por el principio de exclusión de Pauli. Una partícula que obedece el principio de exclusión de Pauli se llama fermión.

El estado cuántico de un fermión queda determinado por su velocidad, su posición y el espín. Para evitar complicaciones innecesarias dejaremos de lado el espín. Debido al principio de exclusión, un gas de electrones no puede comprimirse más allá de cierto valor. Al ir comprimiendo el gas de electrones, estos aumentan su velocidad para evitar estar en el mismo estado que otros. A este gas donde los electrones han aumentado su velocidad debido al principio de exclusión de Pauli se le llama gas degenerado y sus propiedades son muy diferentes a un gas clásico. En el caso de las estrellas, la presión de un gas degenerado puede detener el colapso gravitacional. En la evolución estelar, dependiendo de la masa original de la estrella, se pueden presentar los siguientes casos.

1. La estrella al agotar su combustible nuclear se colapsa y termina en una estrella apagada de núcleos atómicos y electrones. La presión gravitacional conduce a la reducción del diámetro de la estrella. Esta reducción del diámetro aumenta la densidad y llega un momento que los electrones ejercen una presión, llamada presión de Fermi, la cual se origina en el principio de exclusión de Pauli, que equilibra la presión gravitacional, deteniendo el colapso. Esto es lo que le ocurrirá a nuestro Sol. Terminando en una enana blanca la cual evolucionará hacia una enana negra al apagarse totalmente.
2. Si la masa de la estrella excede un cierto valor conocido como el límite de Chandrasekar, la estrella al agotar su combustible nuclear y quedarse formada por un gas de electrones y núcleos atómicos, no podrá detener el colapso gravitacional. El gas de electrones no podrá ejercer la presión suficiente para equilibrar la presión gravitacional. En estas condiciones la estrella reduce su diámetro hasta que los electrones adquieren una enorme energía cinética debido al principio de exclusión. Los protones de los núcleos se unen con los electrones en una reacción nuclear del tipo $e^- + p \rightarrow n + \nu$. Donde e^-, p, n y v representan, electrones, protones, neutrones y neutrinos respectivamente. Como observamos, se forman neutrones a partir de los electrones y protones de la estrella. A este proceso se le conoce como neutronización de la

estrella.[3] El producto final de este proceso, es una estrella de neutrones y una enorme cantidad de neutrinos arrojados al espacio. A este fenómeno se le conoce como supernova y el núcleo de la estrella, convertido en una estrella de neutrones, tiene un radio de 20 kilómetros y una densidad de miles de millones de toneladas por cm^3. Estas estrellas han sido observadas en el universo y se conocen como pulsares.

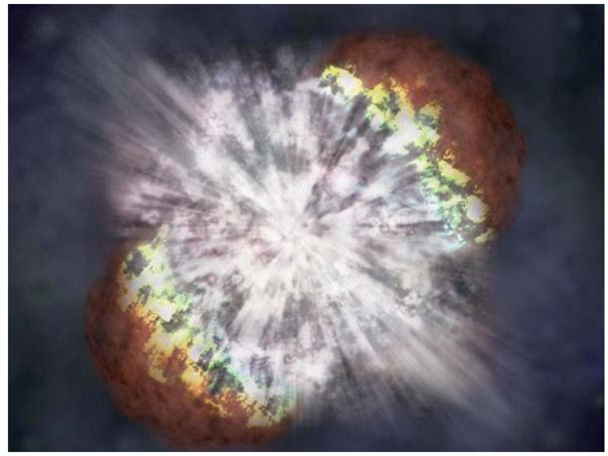
3. Se cree que si la masa original de la estrella es un poco mayor que la que corresponde a un final de estrella de neutrones, entonces se formará una estrella de quarks. Este hecho es una especulación teórica pues no se tiene aún evidencia de la existencia de tales estrellas.
4. Estrellas muy masivas no pueden detener el colapso gravitacional en su evolución final y se colapsan más allá del radio de Schwarszchild, terminando como hoyos negros. Estos son detectados por los efectos gravitacionales que producen sobre las estrellas vecinas.

Las estrellas de neutrones pueden evitar el colapso gravitacional debido a que los neutrones obedecen el principio de exclusión de Pauli y el sistema de neutrones no puede ser comprimido más allá de cierto límite.

ESTRELLAS DE QUARKS

Los neutrones están formados por quarks y se ha especulado que bajo ciertas condiciones de presión gravitacional y temperatura, los neutrones que forman las estrellas de neutrones se pueden descomponer en sus constituyentes dando lugar a una sopa de quarks y gluones. Este sería el estado en el que supuestamente se encontraba el universo entero durante los primeros microsegundos después del big bang. El resultado de este proceso llevaría a la formación de una estrella de quarks, la cual, por ciertas razones de descomposición de los mismos quarks originales, degeneraría en quarks del tipo extraño. La estrella sería una forma exótica de materia altamente comprimida llamada materia extraña. Este sería uno más de los estados exóticos de la materia.

Existe un tipo de materia para la cual no se tiene ninguna estructura específica ya que se sabe que existe en todas las regiones del universo pero no se ha identificado su composición. Esta materia ha recibido el nombre de materia oscura. Se piensa que parte de esta materia oscura podrían ser las estrellas de quarks o estrellas de materia extraña.



Astrónomos han anunciado que han encontrado una nueva explicación para un raro tipo de explosión super-luminosa, que puede ser una estrella de quarks.

Se ha calculado que en algunas estrellas, bajo ciertas circunstancias, energéticamente es más favorable la formación de estrellas de quarks que el proceso de colapso gravitacional.

MATERIA OSCURA

Las técnicas de observación de los objetos astronómicos y en general del universo exterior, están basadas en el análisis de la información que nos llega mediante la luz. Esta luz abarca prácticamente todo el espectro electromagnético, desde las regiones invisibles como las ondas de radio, hasta la radiación gamma, incluyendo por supuesto, la estrecha región del espectro visible. A la materia observada mediante esta técnica se le conoce como materia luminosa, aunque solo una pequeña fracción del espectro corresponda a la región visible.

En el año de 1975, la astrónoma norteamericana Vera Rubin se interesó por estudiar el brillo de las galaxias espirales.[4] Se pensaba que la distribución del brillo de una galaxia debería seguir el mismo patrón que el de distribución de masa; donde estaban las estrellas más luminosas debería haber más masa, eso es lo que indicaba la lógica basada en la física. Sin embargo, lo que ella y su equipo



La Galaxia de Andrómeda a 2.5 millones de años luz de la tierra.

de colaboradores encontraron fue que esto no era lo que arrojaban las observaciones. Se esperaba que en la parte central de las galaxias, que es la región más brillante, estuviera concentrada la mayor parte de la masa de la galaxia y que las estrellas cercanas a este centro, se movieran alrededor del mismo a mayor velocidad que las más externas.

El análisis anterior es similar a lo que ocurre en nuestro sistema solar. La parte más brillante es el Sol, el cual es el centro del sistema solar. Si observamos el movimiento de un planeta notamos que debido a que la fuerza gravitacional disminuye con el cuadrado de la distancia, los planetas más alejados del Sol, se moverán más lentamente que los que están más cerca. De una manera similar las estrellas más alejadas del centro de una galaxia se espera que se muevan más lentamente que otras más cerca del centro.

Rubin y su equipo, encontraron que al graficar la velocidad de las estrellas como función de la distancia al centro de la galaxia, en vez de obtener una curva que mostrara que la velocidad disminuía con la distancia, lo que se obtuvo fue una línea recta. Esto indicaba que las estrellas lejanas al centro se movían tan rápidamente como las cercanas y, peor aún, en algunos casos lo que se observa es que las estrellas más externas de la galaxia se mueven más rápido que las interiores. Este extraño fenómeno ocasionaría que las galaxias se desintegraran por la "fuerza centrífuga", pues no se tendría suficiente masa en el interior de la galaxia para mantener unidas a las estrellas externas. Este fenómeno sería semejante al de una rueda a la que se le adhiere lodo en su parte externa y al girar rápidamente este se desprende siendo lanzado hacia el exterior. Las observaciones se realizaron en más de 200 galaxias y el resultado fue siempre el mismo.

Se han calculado las masas totales de las galaxias usando la información captada en todo el espectro electromagnético (de toda la materia luminosa que se observa) y a partir de esta información, con la ley de la gravitación, se puede evaluar la velocidad de las estrellas. El resultado ha sido que debe haber como un 96% más de masa que la que se encuentra como materia luminosa. Inclusive al observar el movimiento de una galaxia en un conglomerado de galaxias se encuentra que la materia faltante, la que no es luminosa es de alrededor del 96% de la materia visible. A esta materia faltante, la que se requeriría para explicar el movimiento observado de las estrellas y galaxias, se le conoce como materia oscura.



Imagen generada por computadora de la distribución de materia oscura en un cúmulo de galaxias.



Imagen de polvo cósmico en las Encantadores Pleiades.

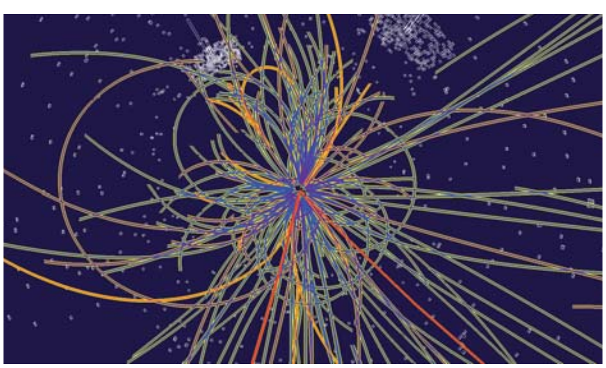
La búsqueda de la materia oscura es actualmente uno de los grandes retos de los astrónomos y de los físicos de partículas. Su naturaleza es hasta el momento completamente desconocida y se cree que una parte de esta materia está formada por partículas no detectadas hasta ahora. La única manera de detectar la materia oscura es por sus efectos gravitacionales pues, como su nombre lo indica es materia que no se ve y de ahí deriva su nombre, en contraposición con el de la materia luminosa.

CANDIDATOS PARA LA MATERIA OSCURA

Los extremos se tocan, afirmaba Aristóteles. En la física del macromundo y del micromundo esta afirmación aristotélica adquiere una gran relevancia: lo muy pequeño y lo muy grande están conectados. El mundo cósmico y el mundo subatómico son interdependientes ya que el origen y la evolución del universo dependen del comportamiento de las partículas elementales. Se ha encontrado que los problemas de los fenómenos astronómicos y cosmológicos tienen la solución en los fenómenos que ocurren en el mundo de las partículas elementales.

El ser humano realiza la observación del espacio exterior a la Tierra a través de telescopios que detectan la radiación electromagnética. Para que la materia emita radiación electromagnética se requiere que posea carga eléctrica o, más generalmente, que se acople o interaccione con el campo electromagnético. La materia oscura o invisible, por lo tanto, no interacciona con el campo electromagnético.

La masa faltante en el universo no se espera que esté compuesta de materia ordinaria, es decir no está formada de los elementos químicos que encontramos aquí en la Tierra. Tampoco se espera que esté constituida por protones, neutrones y electrones. Esta materia es algo extraordinario, un tipo de materia exótica que no conocemos hasta ahora.


Simulación del decaimiento del Bosón de Higgs.

Las interacciones o fuerzas que conocemos son: la gravitacional, la electromagnética, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte. Es posible que la materia oscura no interaccione mediante ninguna de estas fuerzas, solo la gravitacional. Sin interacción gravitacional no podríamos explicar el efecto de la materia oscura sobre el movimiento de los cuerpos astronómicos.

El problema de la materia faltante se ha observado no solo en nuestra galaxia sino en todas las que se han observado. De esto se concluye que este es un problema cosmológico y que la materia oscura está presente en todo el universo. En una imagen pictórica se piensa que la materia oscura es como un mar inmenso donde está metida la materia luminosa.

Se ha estimado que la materia faltante del universo es mayor que la materia luminosa por un factor cercano a cien. La materia bariónica, es decir, la que está compuesta de protones y neutrones y que es de difícil observación, como los agujeros negros, las estrellas de neutrones, los planetas fríos, las estrellas apagadas y el polvo cósmico, solo contribuye con un factor de dos para la masa faltante u oculta como le llaman algunos. El resto de la masa faltante, que sería un factor de 50 veces la masa de la materia luminosa, es la materia oscura de la que hasta ahora desconocemos su composición.

Hay una lista muy larga de propuestas para los candidatos a formar parte de la materia oscura del universo. No hay todavía un acuerdo sobre cual es la naturaleza de la materia oscura. Se ha hecho una primera clasificación de la materia oscura, dividiéndola en materia oscura caliente y materia oscura fría.[5] Hay partidarios de una y de otra. Los partidarios de la materia oscura caliente dicen que esta está formada de partículas conocidas difíciles de detectar, como los neutrinos. Estos resultan prácticamente invisibles. La lista de candidatos se agrupan en el acrónimo MACHO (Massive Compact Halo Objects).[6] Esto correspondería a los agujeros negros, estrellas apagadas en general, a planetas como Júpiter, polvo cósmico, etc.

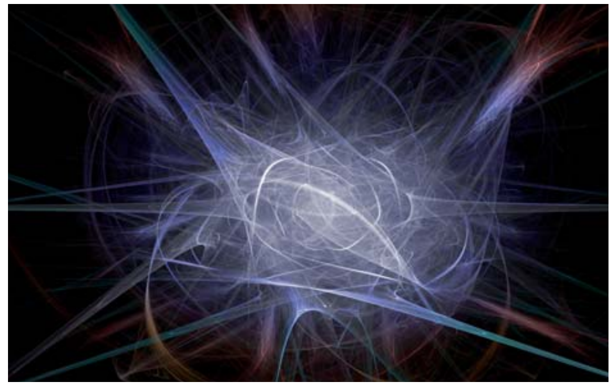
Por otro lado, los partidarios de la materia oscura fría buscaron su propia expresión para agrupar en ella el tipo de materia que consideran es el ingrediente fundamental de la materia oscura. En contraposición con MACHO, propusieron el nombre WIMPs, que podría traducirse como "mariquitas". WIMPs es el acrónimo de Weakly Interacting Massive Particles. En la lista de WIMPs entran partículas que no se han detectado aún pero son predichas por teorías que son extensiones del modelo estándar. Estas partículas son llamadas también supersimétricas o superpartículas. También podríamos incluir aquí los axiones.[6]

Otro candidato para la materia oscura, que podría penetrarlo todo en el universo, es el llamado campo de Higgs. Este campo es el que produce el efecto de masa de las partículas, al interaccionar con toda la materia que conocemos: protones, electrones, neutrones, y todo tipo de partículas, dotándolas de masa, a unas con más y a otras con menos, dependiendo de la intensidad con la que interactúan con este campo, conocido también como bosón de Higgs. El boson de Higgs no interacciona con el campo electromagnético.

Por mucho tiempo se pensó que nosotros estábamos hechos de la misma materia que todo el universo, pero ahora sabemos que no. La materia oscura, que es la materia dominante en cantidad en el cosmos, es todavía desconocida para nosotros.

ENERGÍA OSCURA

Otro de los problemas preocupantes de la astronomía moderna es el de la energía oscura. La energía oscura está asociada con una clase de materia hasta ahora desconocida que se ha introducido con el propósito de explicar el efecto observado de que el universo se está expandiendo cada vez más rápido, es decir, la expansión del universo es acelerada. No conocemos hasta ahora la naturaleza de la energía oscura pero produce un efecto de gravedad repulsiva o antigravedad. Determinar la composición de la energía oscura es otro de los desafíos que los científicos tienen en la actualidad. La energía oscura se inscribe también en la lista de los tipos de materia exótica.



Simulación por computadora de la distribución de energía oscura en el cosmos.

Los problemas de la materia oscura y la energía oscura están en la actualidad entre los retos más desafiantes de la ciencia. Todos estos misterios del cosmos hacen más fascinante el mundo en el que vivimos y lo es porque en el intento de descifrar sus misterios nos lleva de una aventura intelectual a otra.

REFERENCIAS

1. Baierlein, Ralph, Thermal Physics, Cambridge University Press, (1999).
2. Hughes, I. S., Elementary Particles, 3rd. Edition, Cambridge University Press, (1996).
3. Das, A. and Ferbel, T. Introduction to nuclear and particle Physics, 2nd edition, (2005).
4. Matos, Tonatiuh, ¿De qué está hecho el universo?, FCE, (2004).
5. Kaku, Michio, Beyond Einstein, Anchor Books, (1995).
6. Siegfried, Tom, Strange Matters, Berkeley Books, N. Y. (2002).
7. Kaku, Michio, Einstein's Cosmos, Atlas Books, (2004).